

УДК 624.044:624.012.4

# ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ «РАСПОРКИ И ТЯЖИ» ДЛЯ ОДНОПРОЛЕТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, ЗАГРУЖЕННЫХ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ СИЛОЙ

**О.Г. САННИКОВА; д-р техн. наук, проф. В.В. ТУР**  
(Брестский государственный технический университет)

Демонстрируются результаты экспериментальных исследований однопролетных железобетонных балок, нагруженных сосредоточенной силой в середине пролета. Представлен расчет опытных балок в соответствии с положениями модели «Распорки и тяжи», приведенными в зарубежных нормативных документах. Дан сравнительный анализ результатов экспериментальных и теоретических значений разрушающей нагрузки для опытных балок.

**Ключевые слова:** железобетонные балки, двухпанельная модель, продольное и поперечное армирование, разрушающая нагрузка, конструктивное решение.

**Введение.** Для возможности апробации алгоритма расчета [1] для элементов без предварительного напряжения арматуры в соответствии с моделью «Распорки и тяжи», а также для верификации основных положений данной модели, предложенных в нормативных документах [2–5], проведены экспериментальные и теоретические исследования четырех балочных однопролетных образцов из тяжелого бетона, нагруженных одной сосредоточенной силой в середине пролета. Варьируемым параметром опытных образцов принимался тип продольного и поперечного армирования.

**Методика проведения экспериментальных исследований.** Конструктивное решение опытных балок приведено на рисунке 1, номенклатура балок представлена в таблице 1.

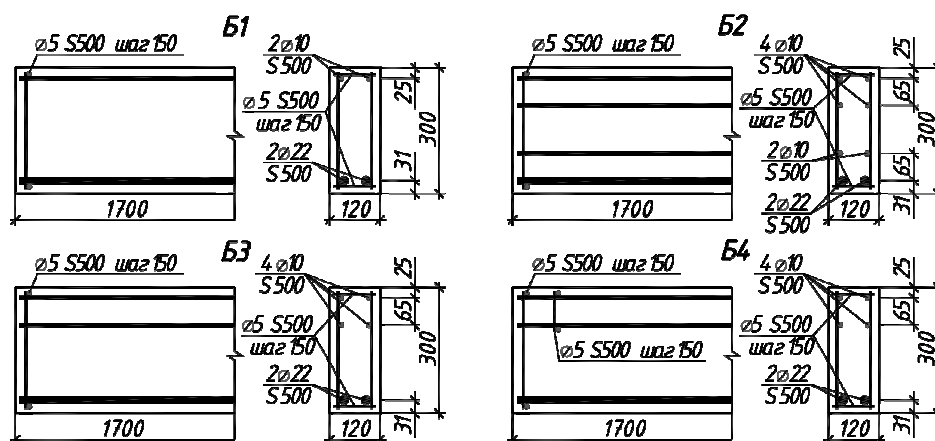


Рисунок 1. – Конструктивное решение опытных образцов

Таблица 1. – Номенклатура опытных образцов

Маркировка образцов	Геометрические параметры образцов, $b \times h \times L$ , мм	Средняя кубическая прочность бетона в возрасте 28 сут, МПа	Площадь поперечного сечения продольной арматуры, см <sup>2</sup>	
			верхней	нижней
Б1	120×300×1700	29,6	1,54	7,6
Б2		29,5		
Б3		29,2		
Б4		29,6		

Все опытные образцы изготовлены в заводских условиях. Одновременно с опытными балками бетонировались контрольные образцы (кубы 10×10×10). Балки и контрольные образцы твердели в пропарочной камере, затем (до момента испытания) – в воздушно-сухих условиях.

Прочность бетона на сжатие (см. таблицу 1) определена в лаборатории в заводских условиях в соответствии с требованиями [6].

Физико-механические характеристики арматурных стержней определены в лабораторных условиях в соответствии с [7]: для арматуры Ø22 S500 – в машине разрывной универсальной УМН-100;

для арматуры Ø10 S500 – в машине разрывной ИР-515-500-11; для арматуры Ø5 S500 – в машине испытательной универсальной Quasar 25 № VAPF (таблица 2).

Таблица 2. – Физико-механические характеристики арматурных стержней

Диаметр стержня, мм	Физический предел текучести, $f_{yt}$ , МПа	Модуль упругости, $E_s$ , ГПа
5	708	200
10	563	
22	577	

Статические испытания опытных балок производили по схеме однопролетной балки на изгиб.

Пролет среза для всех балок принят  $a/d = 2,5$ .

Все опытные балки разрушились по диагональной трещине в результате разрушения бетона над вершиной диагональной трещины (рисунок 2).

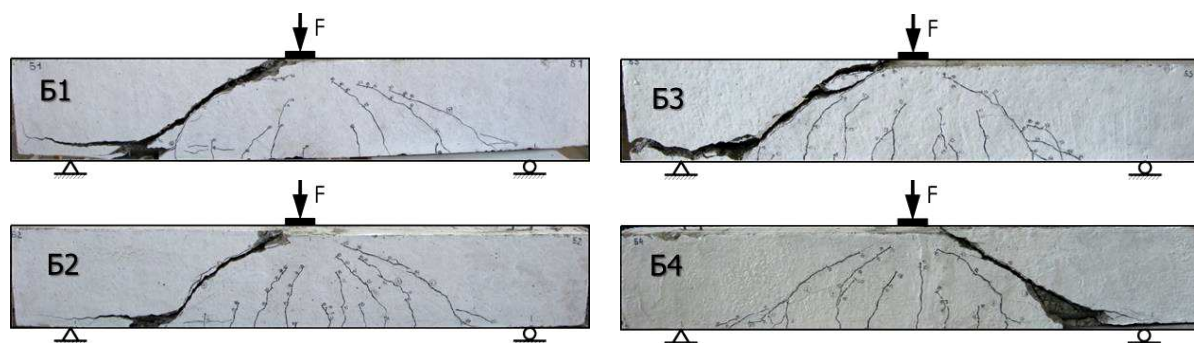


Рисунок 2. – Разрушение опытных образцов

**Расчет опытных балок в соответствии с моделью «Распорки и тяжи».** В соответствии с алгоритмом расчета «Распорки и тяжи» [1] выполнено разделение опытных балок на области с равномерным ( $B$ -область) и неравномерным ( $D$ -область) распределением напряжений, основываясь на принципе Сен-Венана, а также определены (в общем виде) значения опорных реакций (рисунок 3).

Ввиду незначительных размеров областей с равномерным распределением напряжений допускается рассматривать весь конструктивный элемент как область с неравномерным распределением напряжений.

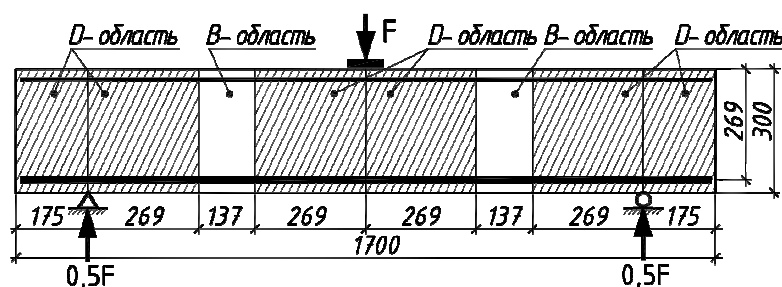


Рисунок 3. – Разделение образцов на  $B$ - и  $D$ -области

Поскольку в настоящих исследованиях расчет в соответствии с моделью «Распорки и тяжи» выполняется при известных геометрических параметрах железобетонных балок, определение предварительных геометрических параметров на основании расчета предельной поперечной силы в эксплуатационный период можно опустить.

С учетом требований к построению модели [1] наиболее рациональной является двухпанельная модель, полученная на основании принципа «траектории эффекта нагрузки» (рисунок 4, а).

Усилия, действующие в распорках и тяжах, определены на основании статической схемы методом вырезания узлов (рисунок 4, б) и показаны в общем виде.

Основные параметры расчетной модели «Распорки и тяжи» приведены в таблице 3.

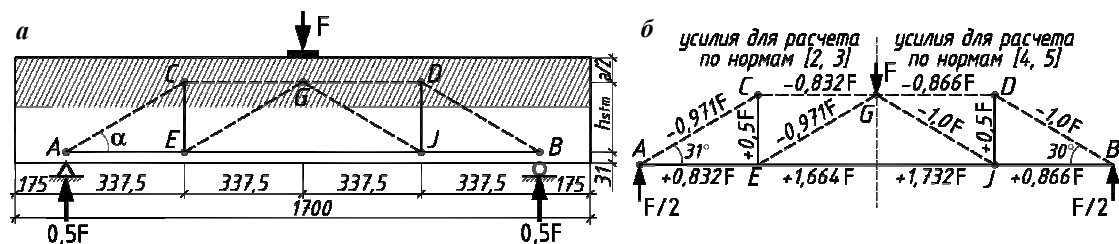


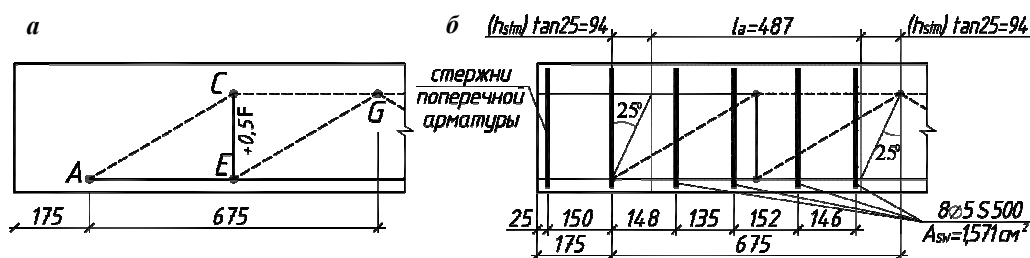
Рисунок 4. – Двухпанельная модель «Распорки и тяжи» (а) и усилия в структурных элементах (б)

Таблица 3. – Параметры модели «Распорки и тяжи» для опытных балок Б1–Б4

Маркировка образцов	Параметры					
	высота сжатой зоны $a$ , см		оптимальная высота модели $h_{stm}$ , см		угол наклона распорки $\alpha$ , град	
	[2; 3]	[4; 5]	[2; 3]	[4; 5]	[2; 3]	[4; 5]
Б1	13,6	14,5	201	196	31	30
Б2	13,7	14,5	201	196		
Б3	13,8	14,7	200	195,5		
Б4	13,6	14,5	201	196		

**Определение сопротивления растянутых тяжей****Вертикальный растянутый тяж СЕ**

Расчетная схема для определения предельного усилия в растянутом тяже **СЕ** приведена на рисунке 5. С учетом фактического расстояния между стержнями поперечной арматуры во всех опытных балках (Б1–Б4) по длине  $l_a$  было расположено 8Ø5S500 ( $A_{sw} = 1,571 \text{ см}^2$ ). Следовательно, предельное усилие в тяже **СЕ**, определенное по зависимости (4) в [1], для балок Б1–Б4 составляет  $F_{u, tie, w} = 111,2 \text{ кН}$ .



а – фрагмент модели «Распорки и тяжи»;

б – схема расположения стержней поперечной арматуры

Рисунок 5. – Расчетная схема растянутого тяжа СЕ

**Горизонтальный растянутый тяж ЕЈ**

Из всех горизонтальных растянутых тяжей, располагаемых в центре тяжести растянутой арматуры, к расчету принимаем тяж **ЕЈ**, в котором действует наибольшее усилие. Предельное усилие в растянутом тяже **ЕЈ**, определенное по зависимости (4) [1], для всех опытных балок (Б1–Б4) составило  $F_{u, tie} = 438,5 \text{ кН}$ .

**Проверка прочности наклонных центрально сжатых распорок АС (ЕГ)**

Предельные усилия в сжатых наклонных распорках **АС (ЕГ)** для балок Б1–Б4, определенные в соответствии с нормативными документами [2–5] по зависимости (5) [1] с учетом коэффициента разупрочнения бетона, приведены ниже, в таблице 4.

**Проверка прочности узловых элементов**

При определении прочности узловых элементов следует различать тип узла (ССС, ССТ, СТТ), а также тип рассчитываемой узловой поверхности.

Классификация узловых элементов для балочных образцов Б1–Б4 приведена на рисунке 6. Узловые элементы **С, D, E, J** не примыкают к местам приложения нагрузки и к опорам, следовательно, согласно [8], их можно классифицировать как «размазанные» узлы, а проверку их прочности опустить.

Вычисление предельных усилий, воспринимаемых каждой узловой поверхностью, для узлов **А, В, G** выполняем, предварительно определив геометрические параметры отмеченных узлов (рисунки 7–9).

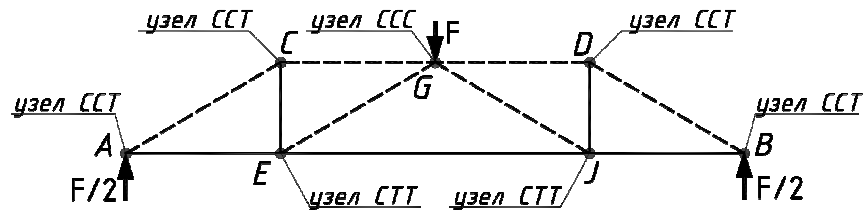


Рисунок 6. – Классификация типов узловых элементов для опытных балок

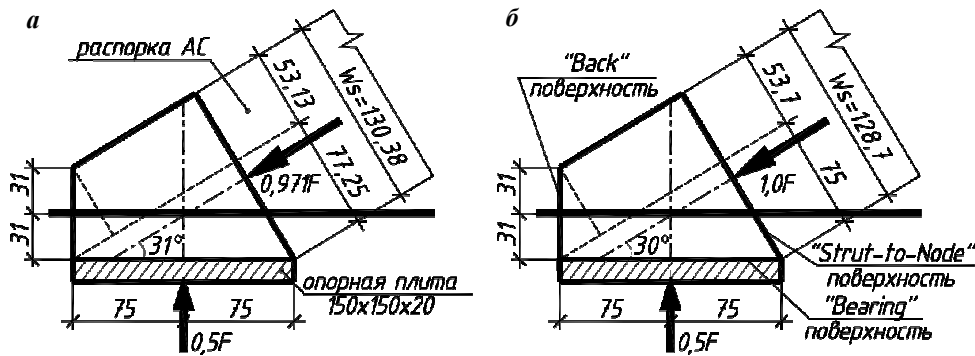


Рисунок 7. – Геометрические параметры узлового элемента А (В) типа CCT в опытных балках Б1–Б4 для расчета по нормам [2; 3] (а); для расчета по нормам [4; 5] (б)

Как было отмечено выше, в случае узлов типа CCC (в опытных балках – узел G) при схождении более трех сжатых распорок следует выполнить корректировку расчетной схемы (рисунок 8).

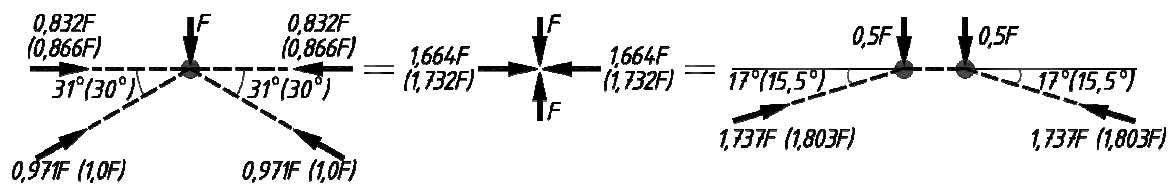
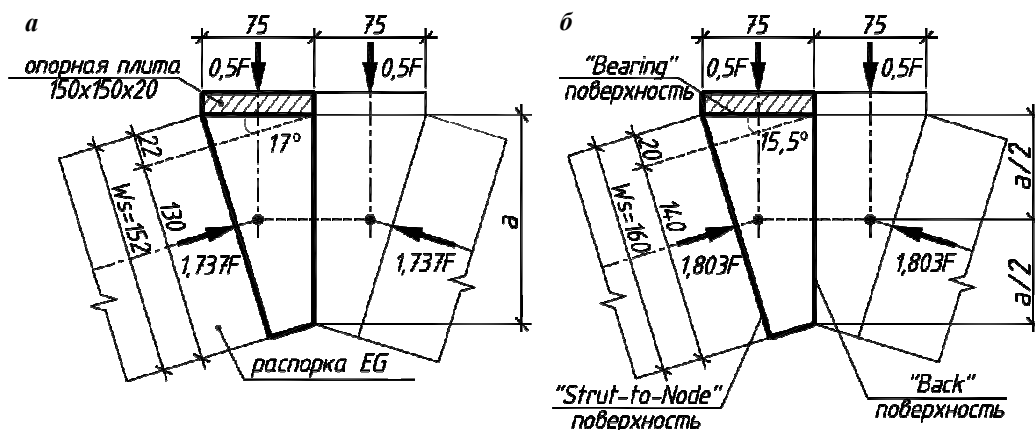


Рисунок 8. – Корректировка расчетной схемы узлового элемента G типа CCC (без скобок приведены значения усилий для расчета по нормам [2; 3], в скобках – по нормам [4; 5])



а – для расчета по нормам [2, 3]; б – для расчета по нормам [4, 5]

Рисунок 9. – Геометрические параметры узлового элемента G типа CCC в опытных балках Б1–Б4

Результаты определения предельных усилий, действующих по поверхностям узловых элементов, для балок Б1–Б4 в соответствии с нормами [2–5] приведены в таблице 4. Следует отметить, что ввиду особенностей конструктивного решения опытных образцов и характерной картины трещинообразования расчет выполнялся только по отношению к “Strut-to-Node”-поверхности и “Bearing”-поверхности.

Таблица 4. – Значения предельных усилий в структурных элементах опытных балок

Маркировка образца	Структурный элемент модели		Предельное усилие в структурном элементе, кН, при расчете по нормам			
			[2]	[3]	[4]	[5]
Б1	Узел А (В), тип ССТ	“Bearing”-поверхность	203,7	308	360	257,4
		“Strut-to-Node”-поверхность	177	267,7	308,8	220,7
	Узел Г, тип ССС	“Bearing”-поверхность	101,9	192,6	240	226,4
		“Strut-to-Node”-поверхность	206,5	390	512	483,1
	Распорка АС		275,6	200,7	308,8	220,7
	Распорка ЕГ		321,2	234	384	274,4
Б2	Узел А (В), тип ССТ	“Bearing”-поверхность	316	307	358,7	256,4
		“Strut-to-Node”-поверхность	262,2	267	307,7	220
	Узел Г, тип ССС	“Bearing”-поверхность	191,9	191,9	239,5	225,7
		“Strut-to-Node”-поверхность	305,5	388,8	511	481,5
	Распорка АС		274,5	250,4	307,7	220
	Распорка ЕГ		321	291,6	382,6	273,5
Б3	Узел А (В), тип ССТ	“Bearing”-поверхность	312,7	303,8	357	253,8
		“Strut-to-Node”-поверхность	260,3	264,1	306,2	217,7
	Узел Г, тип ССС	“Bearing”-поверхность	189,9	190	237,9	223,4
		“Strut-to-Node”-поверхность	303,3	384,8	507	476,5
	Распорка АС		272	247,6	306,2	217,7
	Распорка ЕГ		316,8	288,6	380,6	270,7
Б4	Узел А (В), тип ССТ	“Bearing”-поверхность	317	308	360	257,4
		“Strut-to-Node”-поверхность	262,6	267,7	308,8	220,7
	Узел Г, тип ССС	“Bearing”-поверхность	192,4	192,6	240	226,4
		“Strut-to-Node”-поверхность	306	390	512	483,1
	Распорка АС		275,6	251	308,8	220,7
	Распорка ЕГ		321,2	292,6	384	274,4

Примечания: 1. При определении предельного усилия по нормам [2] коэффициент разупрочнения  $\nu = 0,45$  как для балки, в которой отсутствует арматура, требуемая для ограничения раскрытия трещины по высоте. 2. Предельное усилие в тяже СЕ для всех балок составило 111,2 кН, предельное усилие в тяже ЕД для всех балок – 438,5 кН.

Теоретические значения разрушающей нагрузки, исходя из прочности структурных элементов для опытных образцов, приведены в таблице 5. Следует отметить, что при расчете узловых элементов минимальное сопротивление оказалось у “Strut-to-Node”-поверхности, следовательно, разрушающая нагрузка приведена исходя из прочности отмеченной поверхности.

Таблица 5. – Значения разрушающей нагрузки в зависимости от прочности структурных элементов в опытных образцах

Маркировка образца	Структурный элемент модели	Разрушающая нагрузка $F_u$ , кН, при расчете по нормам			
		[2]	[3]	[4]	[5]
Б1	Узел А (“Strut-to-Node”-поверхность)	182,3	275,7	308,8	220,7
	Узел Г (“Strut-to-Node”-поверхность)	119*	224,5	284	267,9
	Распорка АС	283,8	206,7	308,8	220,7
	Распорка ЕГ	185	134,7*	213*	152,2*
Б2	Узел А (“Strut-to-Node”-поверхность)	270	275	307,7	220
	Узел Г (“Strut-to-Node”-поверхность)	175,9*	223,8	283,4	267
	Распорка АС	282,7	257,9	307,7	220
	Распорка ЕГ	184,8	167,8*	212,2*	151,7*
Б3	Узел А (“Strut-to-Node”-поверхность)	268	272	306,1	217,7
	Узел Г (“Strut-to-Node”-поверхность)	174,6*	221,5	281,5	264,3
	Распорка АС	280	255	306,1	217,7
	Распорка ЕГ	182,4	166,1*	211*	150,1*
Б4	Узел А (“Strut-to-Node”-поверхность)	270,4	275,7	308,8	220,7
	Узел Г (“Strut-to-Node”-поверхность)	176,2*	224,5	284	267,9
	Распорка АС	283,8	258,5	308,8	220,7
	Распорка ЕГ	185	168,5*	213*	152,2*

Примечания: 1. \*Минимальная разрушающая нагрузка при расчете по соответствующим нормам. 2. Разрушающая нагрузка исходя из прочности тяжа ЕС для всех балок по нормам [2–5] составила 222,4 кН. 3. Разрушающая нагрузка исходя из прочности тяжа ЕД для всех балок по нормам [2; 3] составила 263,5 кН, по нормам [4, 5] – 253,2 кН.

**Сравнительный анализ результатов исследований.** Как следует из данных таблицы 5, несмотря на различия в определении прочности структурных элементов по нормам [3–5], разрушение всех опытных балок следует ожидать от разрушения бетона распорки **EG**, при этом наибольшее различие между расчетными значениями разрушающей нагрузки составило: для балки Б1 – 70%; для балки Б2 – 40%; для балки Б3 – 40,6%; для балки Б4 – 40%. Отметим, что при расчете по нормам [2] разрушение опытных балок Б1–Б4 ожидается от разрушения бетона “Strut-to-Node”-поверхности узла **G** (тип CCC), что по сути также будет происходить в направлении распорки **EG**.

Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений разрушающей нагрузки представлен в таблице 6. Обратим внимание, что для сравнения с экспериментальными данными принимается минимальное расчетное значение разрушающей нагрузки из определенных по соответствующим нормам.

Таблица 6. – Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений разрушающей нагрузки для опытных балок Б1–Б4

Маркировка образца	Расчетное значение разрушающей нагрузки, кН				Экспериментальное значение разрушающей нагрузки $F_{u,exp}$ , кН	$\frac{F_{u,exp}}{F_{u,calc}^{[2]}}$	$\frac{F_{u,exp}}{F_{u,calc}^{[3]}}$	$\frac{F_{u,exp}}{F_{u,calc}^{[4]}}$	$\frac{F_{u,exp}}{F_{u,calc}^{[5]}}$
	$F_{u,calc}^{[2]}$	$F_{u,calc}^{[3]}$	$F_{u,calc}^{[4]}$	$F_{u,calc}^{[5]}$					
Б1	119	134,7	213	152	229	1,92	1,7	1,075	1,5
Б2	175,9	167,8	212,2	151,7	224	1,27	1,33	1,055	1,47
Б3	174,6	166,1	211	150,1	226	1,29	1,36	1,07	1,5
Б4	176,2	168,5	213	152,2	270	1,53	1,6	1,26	1,77
Примечание. $F_{u,calc}^{[2]}$ , $F_{u,calc}^{[3]}$ , $F_{u,calc}^{[4]}$ , $F_{u,calc}^{[5]}$ – расчетное значение разрушающей нагрузки, определенное в соответствии с нормами [2], [3], [4], [5] соответственно.									

Как следует из данных таблицы 6, наилучшая сходимость между расчетными и экспериментальными значениями разрушающей нагрузки наблюдается при расчете по нормам [4]. При этом экспериментальная форма разрушения (по диагональной трещине) полностью совпадает с формой разрушения, определенной по нормам [2–5]; по нормам [3–5] – разрушение по сжато-подкосной зоне EG; по нормам [2] – разрушение по “Strut-to-Node”-поверхности узла G.

Таким образом, на основании выполненных экспериментальных и теоретических исследований балок Б1–Б4 на действие поперечной силы можно сделать следующие **выводы**:

1) принятые варианты армирования балок не оказали существенного влияния на морфологию развития трещин в целом для всех опытных образцов;

2) усиленное армирование сжатой зоны стержнями продольной арматуры (балки Б2 и Б3) не привело к увеличению разрушающей нагрузки. В то же время усиление сжатой зоны короткими стержнями поперечной арматуры (балка Б4) повлекло за собой увеличение разрушающей нагрузки на 20%;

3) при определении разрушающей нагрузки в соответствии с моделью «Распорки и тяжи» по нормам [2–5] дополнительные стержни продольной арматуры в балках Б2, Б3 и Б4 рассматривались в качестве армирования, требуемого для ограничения трещины по высоте сечения (crack control reinforcement). Однако дополнительные короткие стержни поперечной арматуры в балке Б4 при расчете по нормам [2–5] не представилось возможным учесть, что, вероятно, привело к большему расхождению между экспериментальными и теоретическими значениями разрушающей нагрузки для образца Б4 по сравнению с остальными балками;

4) наилучшая сходимость между экспериментальными и теоретическими значениями разрушающей нагрузки наблюдается при расчете по нормам [4]: максимальное отклонение составило 26% для балки Б4. При этом следует отметить значительное расхождение в теоретических значениях разрушающей нагрузки, определенных по нормам [2–5], между собой: для балки Б1 – от 40 до 79%; для балки Б2 – от 20,6 до 39%; для балки Б3 – от 20,8 до 40,6%; для балки Б4 – от 20,9 до 40%;

5) несмотря на значительный разброс теоретических значений разрушающей нагрузки, качественная теоретическая картина разрушения однопролетных опытных балок Б1–Б4 полностью соответствует наблюдаемой в экспериментальных исследованиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Санникова, О.Г. Основные положения модели «Распорки и тяжи» для определения сопротивления срезу железобетонных элементов / О.Г. Санникова, В.В. Тур // Вестник Полоцкого государственного технического университета. – 2018. – № 16. – С. 19–29.

2. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. – 8<sup>th</sup> Edition. – Washington, September 2017.
3. ACI (American Concrete Institute) Committee 318. 2014. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318 – 14) and Commentary (ACI 318R-14). – Farmington Hills, MI: ACI.
4. *fib* Model Code 2010, Vol.1. – Federal Institute of Technology Lausanne – EPFL, Lausanne, March 2010.
5. Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures: prEN 1992-1-1:2018 (Eurocode 2). – Brussel : European Committee for Standardization, April 2018. – 293 p.
6. Методы испытаний бетона. Ч. 3. Определение прочности на сжатие испытываемых образцов : СТБ ЕН 12390-3-2012. – Введ. 29.08.2012. – Минск : Стройтехнорм, 2012. – 19 с.
7. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение : ГОСТ 12004-81. – Введ. 01.07.83. – Минск : Госстандарт, 2011. – 16 с.
8. Schlaich, J. Towards a Consistent Design of Structural Concrete / J. Schlaich, K. Schäfer, M. Jennewein // Journal of the Prestressed Concrete Institute. – May-June 1987. – V. 32. – № 3. – P. 74–150.

Поступила 17.12.2018

**THE VERIFICATION OF “STRUT-AND-TIES”  
MODEL FOR THE SINGLE REINFORCED CONCRETE BEAMS  
WITH THE CONCENTRATED LOAD**

**V. SANNIKAVA, V. TUR**

*The results of experimental investigations of the single reinforced concrete beams with the concentrated load are considered. The calculation of the tested beams in accordance with the “Strut-and-ties” model requirements of current codes is presented. The comparative analysis of experimental and theoretical values of the ultimate load for the tested beams is given.*

**Keywords:** reinforced concrete beams, two-panel model, longitudinal and transverse reinforcement, breaking load, structural solution.